

症例  
ライブラリー肺切除術の  
周術期管理

## 次々に訪れる低酸素血症！

黒木 雅大  
KUROKI, Masahiro松浦 優  
MATSUURA, Yu外山 裕章  
TOYAMA, Hiroaki山形大学医学部附属病院  
麻酔科

## ■症 例

75歳の男性。身長170 cm、体重100 kg (BMI 35)。50年×30本の喫煙歴があり、左上葉肺癌 (Stage II A) と診断された。ロボット支援胸腔鏡下左上葉切除術および肺内・縦隔リンパ節郭清が予定された。既往歴に慢性閉塞性肺疾患 chronic obstructive pulmonary disease (COPD) があり、CT検査では肺気腫像が顕著であった。1秒率は50%で、常時喀痰の訴えがあったものの、Hugh-Jones 分類Iと運動耐容能は保たれていた。

## ■麻酔経過

入室時のバイタルサインは血圧140/70 mmHg、心拍数70 bpm、経皮的末梢動脈血酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>) 98% (室内気) であった。前酸化後、プロポフォール150 mg、レミフェンタニル0.3 μg/kg/min、ロクロニウム50 mgで全身麻酔を導入した。気管支形成術が追加される可能性も考慮し、右用ダブルルーメン気管支チューブ double-lumen endobronchial tube (DLT) を気管挿管後、気管支ファイバースコープ (以下、ファイバー) で右気管支に誘導し位置を調整した。その後、右側臥位にして脊柱起立筋面ブロックを実施した。手術開始前に吸入酸素濃度 (F<sub>I</sub>O<sub>2</sub>) 1.0で換気後、一側肺換気を従圧式調節換気 (PCV)、最高気道内圧16 cmH<sub>2</sub>O、呼気終末陽圧 (PEEP) 5 cmH<sub>2</sub>O、呼吸数16回/minで開始し、1回換気量250 mL程度を得られた。その後のF<sub>I</sub>O<sub>2</sub> 0.6でSpO<sub>2</sub>は94%であった。

手術開始後にSpO<sub>2</sub> 85%、1回換気量150 mLとなった。チューブ位置異常を疑い、F<sub>I</sub>O<sub>2</sub> 1.0にしてファイバーで確認すると、右上葉枝がチューブで閉塞していた。手術を中断して適正位置へ調整した。換気量は240 mL、SpO<sub>2</sub> 96%となった。一側肺換気を維持できていたが、徐々にSpO<sub>2</sub> 88%、換気量は180 mL程度に低下してきた。酸素濃度を上昇させようとしたところ、実はチューブ位置の調整後はF<sub>I</sub>O<sub>2</sub> 1.0のままだった。

さて、あなたならどうする？

## 鑑別のプロセス

分離肺換気中の低酸素血症の原因は多岐にわたるので、あらゆる可能性を考慮し、迅速な対応が求められる。

## ■無気肺

本症例における酸素化悪化の原因として、健側の吸収性無気肺が挙げられる。呼吸器外科手術において、患側肺のすみやかな虚脱は術野確保に重要である。そこで、肺胞内酸素分圧 (PAO<sub>2</sub>) を上昇させ、肺胞内から血管への酸素吸収を利用して、肺分離前に患側肺胞内ガスを脱室素する方法がある。しかし、F<sub>I</sub>O<sub>2</sub>=1.0で健側肺を換気すると、健側に吸収性無気肺が形成されてしまう可能性がある。5分間の酸素投与で無気肺が形成されたとの報告<sup>1)</sup>がある。本症例では、チューブ位置異常の修正後にF<sub>I</sub>O<sub>2</sub>を下げるべきであった。F<sub>I</sub>O<sub>2</sub>=0.6程度であれば無気肺は形成されにくいとされている。もちろん、酸素化が十分な患者であればF<sub>I</sub>O<sub>2</sub>はさらに低くてよい。

肥満による圧排性無気肺も挙げられる。縦隔・腹部臓器により肺実質が圧迫され、無気肺が形成される。肥満患者の場合、麻酔導入ですでに背側無気肺が形成されているとの報告<sup>2)</sup>があり、本症例でも大いにあり得る。対処法は、肺泡リクルートメント手技と適切なPEEP付加である。適切なPEEP値について、分離肺換気中に駆動圧 driving pressure が最小となるPEEPを検討した研究では中央値3 cmH<sub>2</sub>Oと報告<sup>3)</sup>されており、比較的低値である。これは内因性



人工呼吸中(従圧式)に  
気道内分泌物がある場合の  
流量波形

気道分泌物により気道抵抗が増加すること、および呼気時に分泌物が気道内で振動・移動することにより、「のこぎり波」として認められることがある。多くは呼気相に認められるが、多量の分泌物がある場合や、粘稠な分泌物が気道を部分的に閉塞している場合には、吸気相にも認める。

色バツ

色バツ

5H>

白バツ

(以内)

40% ↗

100% (以内)

色80%+2≧90%
色90% / 2a新ゴB
文字・白ヌキ
3/a新ゴM㊤
色10%+2≧10%  
富丸  
(半径4mm)

**コラム ● PEEP値の考え方**

麻酔器に表示される PEEP は麻酔回路の圧であり、8aして呼吸障害への影響を最小限とする考えもある90%。その先には人工鼻や気管チューブなどの抵抗物が存在するため、実際の呼気終末肺胞内圧を反映していない可能性がある。COPD では PEEP 0 cmH<sub>2</sub>O と 低酸素血症時には PEEP 5 ~ 10 cmH<sub>2</sub>O 程度が推奨されており、10 cmH<sub>2</sub>O 以上では健側肺血流が減少して酸素化改善効果が小さくなるとされている。

PEEPの影響と考えられる。一方、リクルートメント手技後に肺コンプライアンスが最大となる PEEP を評価した研究では  $8 \pm 3$  cmH<sub>2</sub>O と報告<sup>4)</sup>されており、至適 PEEP の設定は容易ではない(コラム)。本症例の PEEP 5 cmH<sub>2</sub>O は、体格も考慮するとやや足りなかった可能性がある。

喀痰による閉塞性無気肺も挙げられる。本症例は Brinkman 指数 1500 のヘビースモーカーであり、日常的な喀痰の訴えから慢性気管支炎の存在も示唆された。人工呼吸管理中は、得られるパラメータから喀痰の存在を推測できる。特徴的な所見として、吸気/呼気曲線の異常（のこぎり状波形）（図1）が挙げられ、これは気道内抵抗としての喀痰の存在を反映している。喀痰吸引はファイバーによる選択的実施が望ましいが、多量のときは DLT に付属している吸引管や閉鎖式吸引システムを利用する。

### ■ チューブ位置異常

本症例では術中に DLT 位置異常による右上葉枝の閉塞を認め、ファイバーで確認した。自発呼吸下であるが左側臥位への体位変換時には半数以上の症例で左二次分岐部角度が 5° 以上変化すると報告<sup>7)</sup>があり、注意を要する。また、腫瘍摘出時に対側気管支が牽引されてチューブ位置異常を生じ得るため、手術中にも注意深い観察が必要である。

## ■その後の経過 1

FiO<sub>2</sub> 1.0 を継続していたことに気づき、術者に声をかけて吸収性無気肺を考慮して健側肺泡リクルートメント手技を実施した。体格を考慮して PEEP を 7 cmH<sub>2</sub>O にすると SpO<sub>2</sub> 98% に上昇した。ファイバーでチューブ位置確認と健側肺の喀痰吸引を行った。しかし、しばらくすると、SpO<sub>2</sub> と 1 回換気量は徐々に低下し、分離肺換気の維持が困難となった。

さて、あなたならどうする？

### 对処法

適切なリクルートメント、PEEP 付加、喀痰吸引を実施しても、喫煙などに起因する肺胞レベルでの機能不全がある場合は、酸素化・換気の維持が困難となることが多い。主な原因は、換気血流比不均衡によるシャント増大である。このような状況では段階的対応が必要となる。また、本症例のような COPD を有する患者では、低酸素性肺血管収縮 hypoxic pulmonary vaso-

色バツ  
 文・ス 20%  
 色 60% + ス 20%  
 12a 新jB  
 ス 50%・文・白ス  
 13a ロダンDB (YX)  
 色バツ

▼図A シャントノグラム (文献8より、改変)

メモ シャントノグラム

異なるシャント率における吸入酸素濃度 ( $FIO_2$ ) と動脈血酸素分圧 ( $PaO_2$ ) または  $PaO_2 / FIO_2$  比の関係を示すグラフである (図A)。このグラフから、シャント率が高いほど  $FIO_2$  を上昇させても  $PaO_2$  の改善効果は限定的であることが示される。したがって、酸素化を改善するためには、シャントを減少させることが必要である。

10a  
 ロダンDB

地  
 色 10%  
 ス 10%

(以内) 78 77

白  
 ス  
 色バツ

constriction (HPV) が日常的に生じており、分離肺換気後の HPV による酸素化改善はわずかなことがある。

## ■ 健側肺への PEEP 付加

術野を妨げずに実施可能な方対処法として PEEP の増加が考えられるが、前述のとおり最適な PEEP 設定は容易ではなく、さらに COPD を有する患者では内因性 PEEP が高く効果が限定的であることが多い。

## ■ 患側肺への酸素投与〔持続気道陽圧 continuous positive airway pressure (CPAP)〕

次段階として、虚脱している患側肺へのシャントを減らすことが酸素化改善に最も有効である（シャントノモグラム（メモ）を参照されたい）。CPAP を付加しながらの酸素投与が有用である。筆者らの施設では Shiley™ プロンコ・キャス™ 気管支内チューブ CPAP システム（コヴィディエンジャパン社）を使用している（図2）。患側肺に装着し、酸素 5 L/min 分でダイヤルを希望の圧に設定すればよい。CPAP 付加前に肺泡リクルートメント手技を実施するとより効果的である。多くの症例はこの方法で分離肺換気は可能である。ただし、術野では患側肺が膨張するため、手術進行状況に応じて術者と協議しながら使用する必要がある。

近年、CPAPでは半数の症例で患側肺虚脱が不十分なのに対し、high-flow システムでは  $\text{FiO}_2$  0.95, 60 L/min の投与により、酸素化を維持しつつ CPAP より患側肺虚脱を良好に保てたとする報告がある<sup>9)</sup>。ただし、患側肺へ高濃度で高流量の酸素を投与する場合、電気メスなどによる引火に注意を要する。

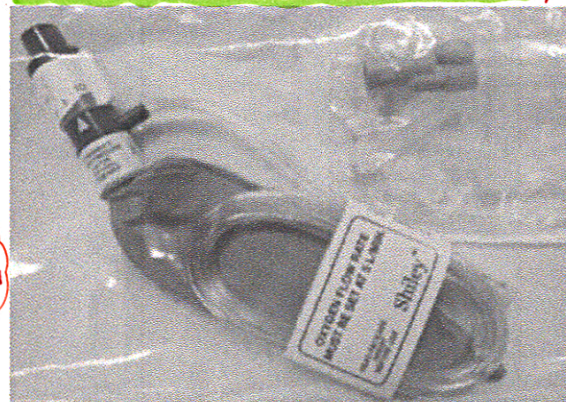
## ■ 高頻度ジェット換気 high-frequency jet ventilation (HFJV)

重症 COPD 患者や肥満患者では、一側肺換気で患側肺への HFJV も選択肢である。ジェットベンチレータ（メラ高頻度ジェットベンチレータ JP-1, 泉工医科工業社）の細管を DLT の患側肺側ルーメンに接続して使用する（図 3）。設定項目は  $\text{FiO}_2$ 、駆動圧（1 bar = 1.01972 kg/cm<sup>2</sup> = 100 kPa）、頻度（Hz）、吸気：呼気比である。 $\text{FiO}_2$  は基本的に低酸素改善が目的であるので通常 1.0 とする。若干の二酸化炭素排出も期待できる。過去の文献では、駆動圧 1.0 ～ 1.8 bar、頻度 1.0 ～ 3.0 Hz とする報告が多い<sup>10)</sup>。換気量はジェット流量に Venturi 効果による巻き込み流量が加算されるため、正確な把握は困難である。駆動圧上昇により巻き込み流量



色ペン { 図3  
当院のジェットベンチレータ  
(幸い、近年使用されず機材室の奥深くにあり探すのに苦労した)

▼図2  
Shiley ブロンコ・キャス気管支内チューブ CPAPシステム



53% ↑  
75% ↓



78% ↑  
54% ↓

は増加するが、十分な排気がされないでエアトラッピングが生じるため、上記の圧設定が妥当と考えられる。もちろん、患側肺は膨張するため、術者とコミュニケーションをとりながらパラメータを設定する。

#### ■肺動脈クランプ

HFJV でも酸素化維持が不可能な場合、鏡視下手術では難しい可能性があるが、患側肺動脈クランプも考慮される。多くの麻酔科医が、肺葉切除術での肺動脈切離後に酸素化改善することを経験していることだろう。これを酸素化改善目的で実施する。肺動脈クランプにより患側肺の肺血流を減少させ、換気血流比不均衡を是正する。ただし、片側肺動脈閉塞による右心系機能評価では、平均肺動脈圧は約35%、全肺血管抵抗係数は約38%上昇し、右室駆出率は約10%低下したとの報告<sup>11)</sup>がある。よって、右心不全の可能性を常に念頭に置き、術者とともに肺動脈クランプの程度と循環を確認しながら実施するべきである。

#### ■その後の経過2

左上葉切除が終了して縦隔リンパ節郭清が開始された。健側肺のリクルートメントに加えて患側肺にCPAPを付加することにより酸素化は改善し、血液ガス分析では動脈血酸素分圧(PaO<sub>2</sub>) 80 mmHg、動脈血二酸化炭素分圧(PaCO<sub>2</sub>) 45 mmHgとまずまずであった。

突然、激烈な換気量減少、続いて低酸素血症に陥った。ファイバーを実施したところ、DLTの位置は適切で、喀痰も認めなかった。

12>

さて、あなたならどうする？

#### 対処法

重度COPD患者では肺気腫に加えてブラ(bulla)を形成していることが多い。本症例では度重なるリクルートメント手技で健側肺のブラが破裂して気胸を生じた。この場合、術野から対側に向けて胸膜を切開し、早急に脱気する。また、大動脈弓近傍のリンパ節郭清時、対側胸腔内まで操作が及び健側肺が損傷する可能性もある(図4)。また、対側壁側胸膜に開いたピンホールから人工気胸の二酸化炭素が流入する場合もある。これらの場合も、損傷部位を拡大して脱気し、仰臥位に戻した後に右胸腔ドレーンを挿入する。

図4  
縦隔リンパ節の分布  
(文献12より、改変)

色ペン

(以内)  
85% ↑  
130% ↓  
(150%以内)

#### キーワード

低酸素血症

高頻度ジェット換気

high-frequency jet ventilation (HFJV)

COPD

肥満

リクルートメント

#### ■まとめ

- 肺切除術と低酸素血症は切っても切れない関係にある。生体情報と呼吸グラフィックスの監視を常に心がけ、酸素化悪化に速やかに対応する。
- 切除する肺のみならず、隣接する重要臓器(大動脈、気管、対側肺)の状況を把握する。
- 術野の観察を常に心がけ、生じ得るトラブルを予見し、その対処法を念頭に置いて管理する。

↔ 23.5% ↓

#### ■さらなる学習のために

- 外山裕章編著・山内正憲監・胸部手術の麻酔 一側肺換気の手技と知識を知る。東京：日本医事新報社、2021。  
胸部の解剖や分離肺換気の基礎から応用のみならず、DLTや気管支ファイバースコープについても詳細に記載されている。大変よくまとめられているので、スポットで読むのではなく、通読してほしい。

#### ■文献

1. Edmark L, Kostova-Aherdan K, Enlund M, et al. Optimal oxygen concentration during induction of general anesthesia. *Anesthesiology* 2003; 98: 28-33.
2. Eichenberger A, Proietti S, Wicky S, et al. Morbid obesity and postoperative pulmonary atelectasis: an underestimated problem. *Anesth Analg* 2002; 95: 1788-92.
3. Park M, Ahn HJ, Kim JA, et al. Driving pressure during thoracic surgery: a randomized clinical trial. *Anesthesiology* 2019; 130: 385-93.
4. Belda J, Ferrando C, Garutti I. The effects of an open-lung approach during one-lung ventilation on postoperative pulmonary complications and driving pressure: a descriptive, multicenter national study. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2018; 32: 2665-72.
5. Slinger PD, Kruger M, McRae K, et al. Relation of the static compliance curve and positive end-expiratory pressure to oxygenation during one-lung ventilation. *Anesthesiology* 2001; 95: 1096-102.
6. Slinger P, Campos JH. Anesthesia for Thoracic Surgery. In: Gropper MA, Eriksson LI, Fleisher LA, eds. *Miller's Anesthesia* 10th ed. Philadelphia: Elsevier, 2025; 1538-40.
7. Ubukata Y, Suga H, Morita Y, et al. Curvature of the left main bronchus caused by postural change from supine to left lateral position. *J Anesth* 2018; 32: 649-51.
8. Benatar SR, Hewlett AM, Nunn JF. The use of iso-shunt lines for control of oxygen therapy. *Br J Anaesth* 1973; 45: 711-8.
9. Sawasdiwipachai P, Weerayutwattana R, Thongcharoen P, et al. Comparison of high-flow humidified oxygen with conventional continuous positive airway pressure in nonventilated lungs during thoracic surgery: a randomized cross-over study. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2021; 35: 2945-51.
10. 松本 勉, 秋元隆英, 石井敬一ほか. HFJVによる気管・気管支再建術の麻酔経験. *日臨麻会誌* 1991; 11: 360-4.
11. 植田信策, 谷田達男, 星川 康ほか. 肺切除術後の右心機能の予測方法: 一側肺動脈閉塞試験における右室拡張末期容量の検討. *日胸疾患会誌* 1993; 31: 1220-6.
12. Japan Esophageal Society. Japanese classification of esophageal cancer, 11th edition: part I. *Esophagus* 2017; 14: 1-36.
13. Karbing DS, Kjaergaard S, Smith BW, et al. Variation in the PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> ratio with FiO<sub>2</sub>: mathematical and experimental description, and clinical relevance. *Crit Care* 2007; 11: R118.